

На правах рукописи

Карякина Екатерина Денисовна



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ТРАНСПОРТИРОВКИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО
ГАЗА ПО ПОЛИМЕРНЫМ ТРУБОПРОВОДАМ**

*Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Шаммазов Ильдар Айратович

Официальные оппоненты:

Кутуков Сергей Евгеньевич

доктор технических наук, доцент, научно-технический центр общества с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», управление математического моделирования и технологий трубопроводного транспорта, главный научный сотрудник;

Зайцев Андрей Викторович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Защита диссертации состоится **27 сентября 2023 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 27 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



ФЕТИСОВ

Вадим Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день сжиженный природный газ (СПГ) является одним из самых перспективных видов топлива для энергоснабжения. В этой связи, происходит развитие инфраструктуры, необходимой для его производства, транспортировки и хранения. Наблюдается тенденция к увеличению числа систем трубопроводного транспорта, которая продиктована прежде всего необходимостью сооружения технологических линий на заводах сжижения, установках регазификации, терминалах по приему и отгрузке СПГ.

Наиболее распространенным материалом, применяемым для устройства трубопроводов перекачки СПГ, являются стали с высоким содержанием никеля. К недостаткам сталей данной группы следует отнести высокую стоимость, обусловленную дефицитностью никеля. При этом, наблюдается интенсивное развитие технологий промышленного производства полимерных материалов, которые сопоставимы по своим прочностным характеристикам со сталью. В этой связи, возникает необходимость поиска альтернативных материалов для сооружения технологических трубопроводов с разработкой соответствующего обоснованного технологического процесса транспортировки СПГ.

Необходимость решения вышеуказанных задач предопределяет актуальность диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования

Проблемы осуществления трубопроводного транспорта СПГ исследовались учеными со второй половины 20 века. В частности, В.А. Жмакиным, Г.Э. Одишарией, В.М. Писаревским, А.Е. Полозовым, Н.И. Преображенским, М.П. Малковым, Б.С. Рачевским, В.С. Сафоновым, Howard F.S., Murphy, D.W, Lye, L.C, Saeid Mokhatab рассматривалась возможность трубопроводной перекачки СПГ по стальным трубопроводам. В то время были разработаны рекомендации, содержащие общую информацию о механических свойствах применяемых сталей, рекомендации по определению параметров транспортировки. Было сооружено несколько трубопроводов СПГ небольшой протяженности. Многие из них проработали недолго из-

за возникновения аварийных ситуаций, вызванных слабой изученностью вопросов трубопроводного транспорта криогенных жидкостей. На сегодняшний день в достаточной мере не проработана нормативная документация в области сооружения трубопроводов сжиженных газов, отсутствуют единые рекомендации по осуществлению теплового и гидравлических расчетов и оценке напряженно-деформированного состояния (НДС).

Исследованиями механизмов разрушения полимерных материалов и их поведения в условиях низких температур занимались С.Н. Журков, Г.М. Бартенев, D.W. Van Krevelen, Okimichi Yano, L.E. Nielsen, Yang Sui, J.B Shultz, однако, полученных результатов недостаточно, имеются трудности по оценке НДС таких труб. В последнее время появляются полимерные материалы, способные работать при криогенных температурах, примером такого материала является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), однако, исследований изменения прочностных свойств СВМПЭ в условиях работы при криогенных температурах недостаточно.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности по пункту:**

П.1. Технологические процессы и технические средства для проектирования, сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта

Предмет исследования - подземный трубопровод из СВМПЭ при его взаимодействии с криогенной жидкостью (сжиженным природным газом).

Объект исследования – процесс движения сжиженного природного газа по полимерному трубопроводу и явление изменения прочностных свойств полимерных материалов в условиях их работы при криогенных температурах.

Цель работы – повышение эффективности технологического процесса транспортировки сжиженного природного газа за счет использования труб из сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

Идея работы заключается в применении сверхвысокомолекулярного полиэтилена в качестве несущего материала трубопровода для транспортировки сжиженного природного газа.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных задач:

1. Провести анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.

2. Экспериментально обосновать возможность использования СВМПЭ в качестве несущего материала трубопровода при рабочих параметрах транспортировки СПГ.

3. Обосновать увеличение расстояния транспортировки с помощью разработанной методики теплового и гидравлического расчетов подземного СПГ трубопровода.

4. Разработать технологический процесс транспортировки СПГ по полимерным трубопроводам.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является реализация комплексного подхода при исследовании возможностей применения СВМПЭ для трубопроводного транспорта СПГ.

Научная новизна работы:

1. Экспериментально установлено явление увеличения прочностных свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена при криогенных температурах с сохранением материалом вязкого характера разрушения за счет увеличения энергии процесса разрушения.

2. Аналитически-расчетным и экспериментальным путем и исходя из результатов компьютерного моделирования разработан технологический процесс транспортировки сжиженного природного газа с применением сверхвысокомолекулярного полиэтилена в качестве несущего материала трубопровода, что способствует увеличению расстояния транспортировки за счет сокращения тепловых и гидравлических потерь.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработан технологический процесс транспортировки криогенных жидкостей, включающий в себя предварительно охлажденный трубопровод, изготовленный из СВМПЭ в изоляционном покрытии (Патент РФ № RU 2761148).

Обнаружено увеличение прочностных свойств СВМПЭ (предел прочности, предел текучести, ударная вязкость) по результатам выдержки образцов в среде жидкого азота в течение двух часов, что расширяет возможности применения указанного материала.

Разработан алгоритм теплового и гидравлического расчетов трубопровода из полимерных материалов с учетом изменения теплофизических параметров транспортируемой жидкости (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665688).

Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению в ООО «Газпром СПГ технологии» (Акт внедрения от 29.05.2023 г.) при проектировании технологических линий сжиженного природного газа на объектах производства СПГ.

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось в соответствии с системным подходом, математическим и имитационным моделированием процессов, экспериментальным исследованием, включающим обработку полученных данных с последующей интеграцией в разработанную модель.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Понижение температуры до уровня транспортировки сжиженного природного газа способствует повышению прочностных характеристик сверхвысокомолекулярного полиэтилена в 1,4 раза, ударной вязкости в 2,5 раза за счет увеличения энергии процесса разрушения.

2. Использование сверхвысокомолекулярного полиэтилена в качестве несущего материала трубопровода в технологическом процессе транспортировки сжиженного природного газа обеспечивает увеличение расстояния транспортировки за счет сокращения тепловых и гидравлических потерь по сравнению с традиционно применяемой хладостойкой сталью.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования. Достоверность результатов работы подтверждается сходимостью экспериментальных и расчетных данных, а также с результатами общепризнанных исследований в области трубопроводного транспорта криогенных жидкостей и прочностных свойств полимерных материалов.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: IV International Conference «AGRITECH IV - 2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies», (ноябрь 2020, Красноярск); III International Conference on Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering, (ноябрь 2020, Красноярск); 74-я международная молодежная научная конференция «Нефть и газ - 2020» (сентябрь-октябрь 2020, Москва); Ежегодная научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение», Санкт-Петербургский горный университет, (апрель 2023, Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке методики исследования, проведении экспериментальных исследований прочностных свойств СВМПЭ при криогенных температурах, разработке и научном обосновании технологического процесса транспортировки сжиженного природного газа по полимерным трубопроводам; участии в написании научных статей по теме диссертации.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 1 статье - в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus, Web of Science). Получен патент и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 162 наименования, пяти приложений. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков и 13 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю Шаммазову И.А., профессору Болобову В.И., сотрудникам кафедры транспорта и хранения нефти и газа и кафедры геоэкологии Горного университета за помощь в работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор мирового опыта по сооружению криогенных трубопроводов, рассмотрены основные применяемые материалы и конструкции изоляционных систем. Выполнен анализ проблем, препятствующих широкому распространению криогенных трубопроводов. Представлены результаты анализа рынка полимерных трубопроводов, определено, что СВМПЭ может рассматриваться потенциальным кандидатом для использования в качестве конструкционного материала при устройстве СПГ трубопровода.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены теоретические исследования особенностей движения криогенных жидкостей по трубопроводам. На основании анализа законов гидравлики и теплопередачи разработана методика проведения теплового и гидравлического расчетов СПГ трубопровода с учетом изменения теплофизических параметров криогенной жидкости, определены условия обеспечения однофазности потока. Проведен сравнительный анализ скорости нарастания температуры СПГ при его движении по трубе, изготовленной из нержавеющей стали AISI 321 и СВМПЭ. Выполнено исследование вли-

яния толщины и типа изоляционного покрытия на распределение температуры по длине трубопровода на основании имитационного моделирования течения СПГ по участку трубопровода, изготовленного из СВМПЭ и стали. Установлено, что температура в стальном трубопроводе увеличивается быстрее чем в аналогичном из СВМПЭ. Приведено описание разработанного технологического процесса транспортировки СПГ с применением СВМПЭ в качестве несущего материала трубопровода.

В третьей главе проведен анализ поведения полимерных материалов в условиях криогенных температур, механизмов их разрушения и изменения механических свойств в криогенных условиях. Описан процесс разработки методики экспериментального исследования. Представлены результаты испытаний СВМПЭ на растяжение и ударную вязкость по методу Шарпи при температуре окружающей среды и после выдержки в среде жидкого азота. Испытания в криогенных условиях свидетельствуют об увеличении прочностных свойств СВМПЭ (предел текучести, предел прочности, ударная вязкость) при сохранении вязкого характера разрушения материала. Доказано, что материал не охрупчивается в условиях криогенных температур.

В четвертой главе проведены теоретические исследования существующих подходов к оценке прочности полимерных материалов, разработана методика оценки НДС подземного полимерного трубопровода, работающего в криогенных условиях. Выполнено моделирование НДС участка подземного СПГ трубопровода, изготовленного из СВМПЭ. Установлено, что возникающие в трубе напряжения не превышают предела текучести материала, установленного экспериментально. Проведен сравнительный анализ результатов теоретической оценки НДС и моделирования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Понижение температуры до уровня транспортировки сжиженного природного газа способствует повышению прочностных характеристик сверхвысокомолекулярного полиэтилена в 1,4 раза, ударной вязкости в 2,5 раза за счет увеличения энергии процесса разрушения.

В рамках исследования прочностных свойств СВМПЭ при криогенных температурах была проведена серия испытаний на растяжение согласно ГОСТ 11262-2017 и ударную вязкость по методу Шарпи в соответствии с ГОСТ 4647 - 2015. В качестве образцов для испытаний на растяжение были выбраны стандартные испытательные образцы типа 2 по ГОСТ 11262-2017, изготовленные из листа СВМПЭ механическим способом. Испытания проводились на разрывной машине Tinius Olsen H75KS при температуре образца, равной температуре окружающей среды $T = 293$ К, а также на охлажденных образцах, выдержанных в жидком азоте в течение двух часов. Температура образцов после их выдержки в среде жидкого азота была определена расчетным путем по уравнению теплового баланса, согласно формуле 1:

$$\alpha F (T_0 - T) d\tau = mc dt, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); F – активная поверхность, вычисляемая по огибающему периметру, м²; T – начальная температура тела, К; T_0 – температура окружающей среды, К; m – масса тела, кг; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К).

Аналогично, путем решения дифференциального уравнения по формуле 1 было определено допустимое время проведения испытания на растяжение образца до его нагрева до температуры перекачки СПГ (111,5 К), которое составило 841 с. Максимальное время проведения испытания составило 180 с., что меньше допускаемого предела.

По итогам проведенных экспериментов были получены диаграммы растяжения материалов, имеющие непрерывный спектр. Обобщенные диаграммы разрушения материала (кривые напряжение/деформация) представлены на рисунке 1.

Для образцов, выдержанных в среде жидкого азота, наблюдается увеличение зоны упругого поведения материала, далее четко прослеживается площадка текучести, значение напряжения в 34,4 МПа соответствует началу образования «шейки» образца, после чего происходит увеличение скорости образования деформаций с дальнейшим разрушением образца при напряжении 37,9 МПа.

Рассмотрев указанные диаграммы, можно сделать вывод о том, что выдержка в среде жидкого азота приводит к увеличению проч-

ностных характеристик СВМПЭ (предела текучести в 1,4 раза, предела прочности в 1,4 раза), но при этом материал продолжает обладать допустимым запасом пластических характеристик.

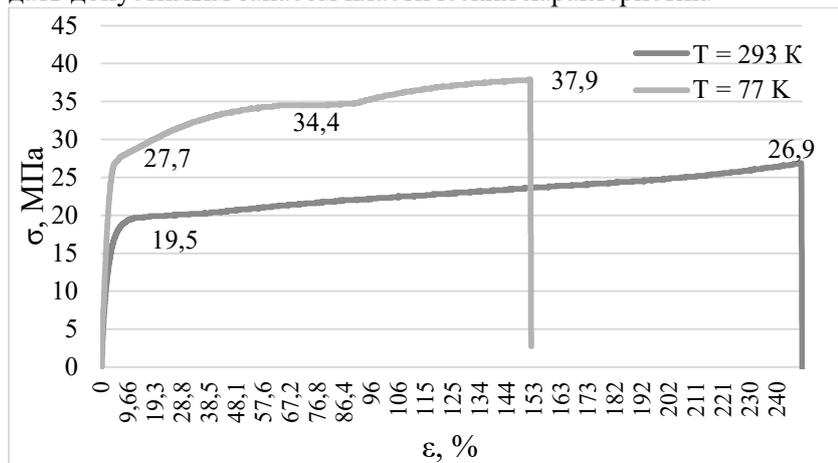


Рисунок 1 - Диаграмма разрушения материала при проведении испытаний на растяжение

На рисунке 2 представлена поверхность разрыва СВМПЭ образцов, выдержанных в течение двух часов в среде жидкого азота. Морфология поверхностей разрыва образцов указывает, что они имеют волокнистую структуру, что свидетельствует о вязком разрушении материала.

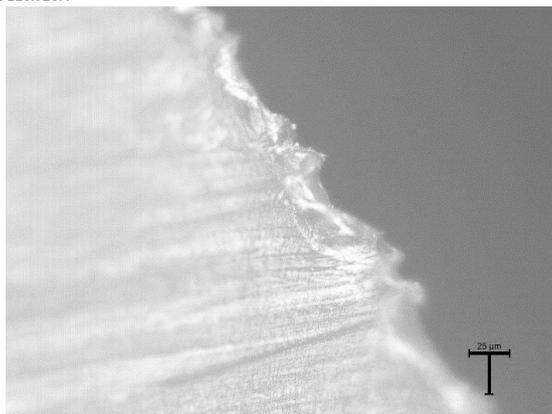


Рисунок 2 - Микроструктура образца на поверхности разрыва

Следующая серия испытаний на ударную вязкость проводилась на образцах типа 1/179-1 (длина 120 мм, ширина 10 мм, толщина 4 мм) без надреза и с надрезом типа А/179-1 (радиус вершины надреза = 0,25 мм).

На рисунках 3 и 4 представлены результаты графики, полученные в ходе испытаний на ударную вязкость по методу Шарпи.

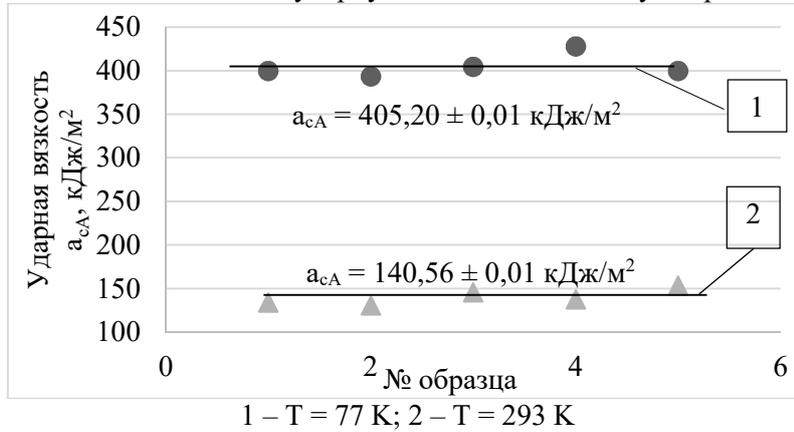


Рисунок 3 – Результаты экспериментальных исследований СВМПЭ на ударную вязкость по методу Шарпи (образцы без надреза)

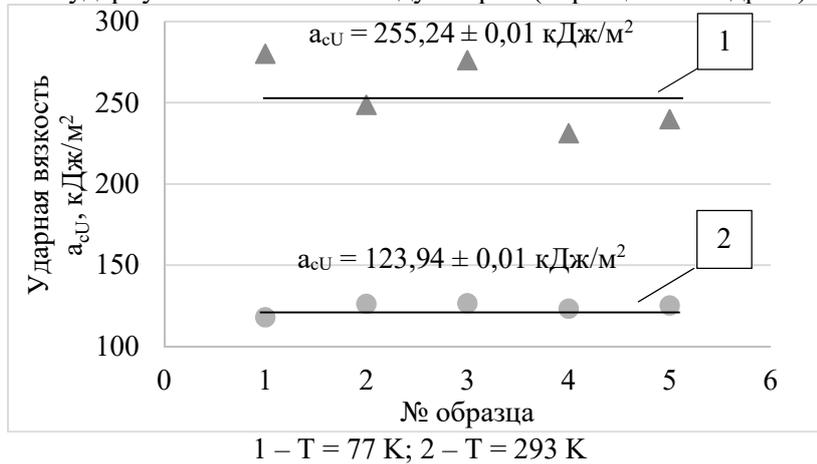


Рисунок 4 – Результаты экспериментальных исследований СВМПЭ на ударную вязкость по методу Шарпи (образцы с надрезом)

Исходя из полученных графиков, наблюдается значительное увеличение ударной вязкости материала для образцов с надрезом и без него. На образцах без надреза среднее значение ударной вязкости при температуре окружающей среды составляет 140,56 кДж/м², далее наблюдается увеличение ударной вязкости после выдержки в среде жидкого азота до 405,20 кДж/м² (в 2,8 раз). Аналогичное явление наблюдается для образцов с надрезом 255,24 кДж/м² и 123,94 кДж/м² соответственно (в 2,1 раза).

Таким образом, первое положение, вынесенное на защиту, **считается доказанным.**

2. Использование сверхвысокомолекулярного полиэтилена в качестве несущего материала трубопровода в технологическом процессе транспортировки сжиженного природного газа обеспечивает увеличение расстояния транспортировки за счет сокращения тепловых и гидравлических потерь по сравнению с традиционно применяемой хладостойкой сталью.

При разработке расчетной методики полагается, что жидкость находится в однофазном состоянии, течение является стационарным. Для обеспечения безопасности транспортировки СПГ добавлено условие в модель, исключающее образование двухфазного потока по всей длине участка (формула 2):

$$\begin{cases} p_{доп} \geq p_s \\ T_{доп} < T_{фп} < T_{кр} \end{cases} \quad (2)$$

где $p_{доп}$ – предельное допускаемое рабочее давление в трубе, МПа; p_s - давление упругости паров СПГ, МПа; $T_{доп}$ - предельная допускаемая температура перекачки СПГ, град; $T_{фп}$ - температура фазового перехода СПГ при данном давлении, град; $T_{кр}$ - превышала критическую температуру СПГ, град.

При движении через рассматриваемый участок СПГ изменяет свою температуру вследствие увеличения теплосодержания и совершения работы при перемещении криогенной жидкости с преодолением сопротивления. Таким образом, согласно формуле 3, уравнение теплового баланса:

$$Gc_p dT = -K\pi d_{вн} (T - T_0) dx + Ggidx, \quad (3)$$

где G – массовый расход криогенной жидкости, кг/с; c_p — коэффициент теплоемкости СПГ, Дж/(кг · К); K – полный коэффициент теплопередачи; трубопровода, м; $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода, м; T – температура СПГ на участке трубопровода x , К; T_0 – температура грунта на глубине заложения трубопровода, К; i – гидравлический уклон; p_i, p_{i+1} – давления в начале и в конце участка трубопровода, соответственно, МПа; x – протяженность участка трубопровода, м.

Проинтегрировав уравнение 3, получается итерационное выражение 4, позволяющее определить температуру СПГ в любой точке потока:

$$T(x) = T_0 + \frac{Gg_i}{K_i \pi d_{вн}} + \left(T_n - T_0 - \frac{Gg_i}{K_i \pi d_{вн}} \right) \cdot e^{-x \frac{K_i \pi d_{вн}}{Gc_{p_i}}} \quad (4)$$

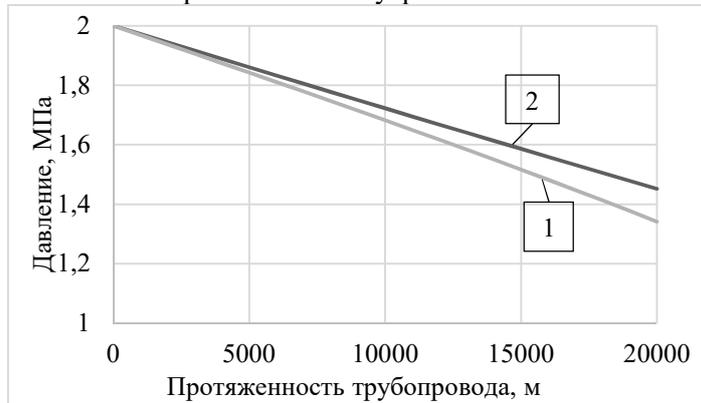
В случае, если неизвестны начальное давление и диаметр трубопровода, то для их определения в первом приближении выполняется гидравлический расчет, полагая, что режим течения стационарный при постоянной температуре, выбранной по диаграмме фазовых состояний для СПГ заданного состава СПГ.

На основании вышеописанных формул, по разработанному алгоритму был осуществлен теплогидравлический расчет по исходным данным, указанным в таблице 1 для трубопровода, изготовленного из СВМПЭ и стали AISI 321. Давление и температура на входе составили 2 МПа и -161,5°С соответственно.

Таблица 1 – Основные характеристики трубопровода

Параметр	Величина	
	СВМПЭ	AISI 321
Наружный диаметр трубы, $d_{н\tau}$, мм	350	351
Внутренний диаметр трубы, $d_{вн}$, мм	286	325
Наружный диаметр трубы с изоляционным покрытием, $d_{из}$, мм	410	411
Длина трубопровода, L , м	20000	
Шероховатость стенки трубы, мм	0,00022	0,2
Массовый расход, G , т/сут	5000	
Коэффициент теплопроводности материала стенки трубы, $\lambda_{тр}$, Вт/(м·К)	0,3	17

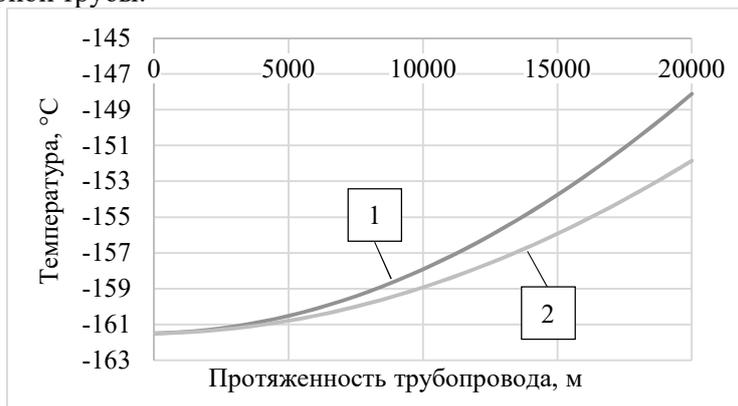
На основании формулы Дарси-Вейсбаха было определено, что падение давления в стальном трубопроводе происходит быстрее чем в аналогичном из СВМПЭ (рисунок 5), что объясняется более высокими значениями шероховатости внутренней стенки стальной трубы.



1 – сталь AISI 321; 2 - СВМПЭ

Рисунок 5 – График падения давления по длине трубопровода

Рост температуры в стальном трубопроводе происходит быстрее, чем в аналогичном из СВМПЭ (рисунок 6), что объясняется значительно меньшим коэффициентом теплопроводности материала полимерной трубы.



1 – сталь AISI 321; 2 - СВМПЭ

Рисунок 6 - Температура СПГ трубопроводе, изготовленном из СВМПЭ и AISI 321

Исходя из этого, достигается сокращение тепловых и гидравлических потерь при движении СПГ по полимерному трубопроводу в сравнении со стальным, что позволяет сделать вывод о том, что для поддержания СПГ в необходимом температурном диапазоне и давлении расстояние между насосными и охлаждательными станциями для стального трубопровода будет меньше, чем для полимерного.

Для оценки НДС подземного СПГ-трубопровода из полимерного материала полагается, что материал изотропен, является монолитной сплошной средой. В пользу данных допущений говорят высокая кристалличность СВМПЭ (более 70 %), а также, что при криогенных температурах происходит увеличение прочности материала за счет упорядочивания связей внутри него. Кроме того, в соответствии с принципом суперпозиции температура-время, полагается, что в материале сведены к минимуму явления ползучести и релаксации напряжений.

Для дальнейшего обоснования эффективности применения СВМПЭ для устройства СПГ трубопровода была произведена его оценка напряженно-деформированного состояния. Предметом исследования является участок подземного трубопровода для транспортировки СПГ, изготовленный из СВМПЭ длиной 1 м, с наружным диаметром 350 мм и толщиной стенки 32 мм в изоляционном покрытии, выполненном из пенополиуретана (ППУ), толщиной 30 мм, глубина заложения трубопровода по верхней образующей 2 м. Давление транспортировки СПГ 2 МПа, температура транспортировки -161,5 °С, температура фиксации расчетной схемы трубопровода 20 °С.

Расчет на прочность проводился на основании адаптации существующих стандартов для полиэтиленовых труб, учитывающих продольные и кольцевые напряжения в соответствии с описанными выше допущениями. В этом случае, эквивалентные напряжения рассчитываются по формуле 5:

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{IV}} = \sqrt{\sigma_{\text{кц}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 - \sigma_{\text{кц}} \cdot \sigma_{\text{пр}}} = 17,81 \text{ МПа}, \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{экв}}^{\text{IV}}$ – эквивалентные напряжения, МПа; $\sigma_{\text{пр}}$ – продольные напряжения, МПа; $\sigma_{\text{кц}}$ – кольцевые напряжения, МПа,

Для оценки адекватности предлагаемых решений была выполнена оценка НДС подземного трубопровода в программном комплексе ANSYS с использованием связанного термоструктурного анализа путем моделирования нагрузок, действующих на трубопровод. Согласно результатам моделирования, представленным на рисунке 7, максимальные напряжения в трубопроводе составили 17,8 МПа, при теоретической оценке по предложенной методике максимальные эквивалентные напряжения составляют 17,81 МПа. Полученные значения не превышают предела текучести в 28,1 МПа. Отклонение, полученное в ходе моделирования и теоретической оценки, составляет менее 1 %, что является допустимой сходимостью при инженерных расчетах.

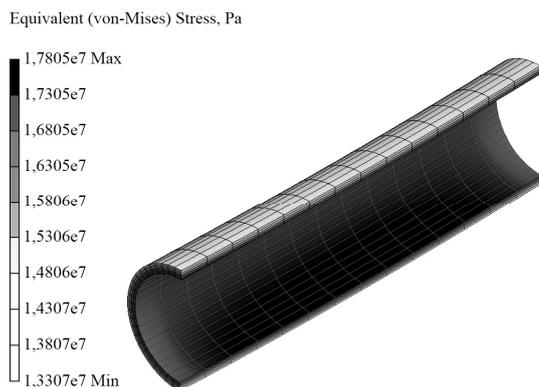
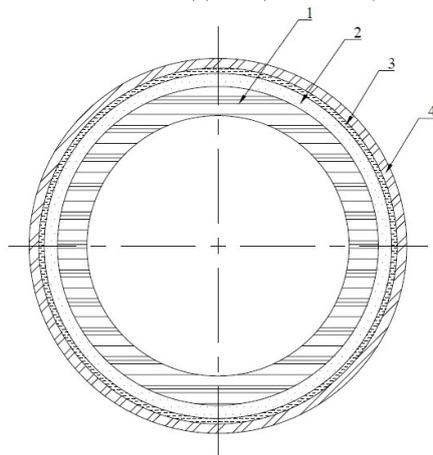


Рисунок 7 – Эпюра напряжений в подземном СПГ трубопроводе, изготовленном из СВМПЭ

Технологический процесс транспортировки СПГ осуществляется следующим образом.

Криогенная жидкость поступает на заполнение с завода сжижения, в предварительно охлажденный жидким азотом трубопровод, что обеспечивает снижение температурных напряжений по осевому сечению трубопровода, способствуя сокращению вероятности образования двухфазного потока при последующем заполнении криогенной жидкостью. При движении рабочее давление должно быть выше давления упругости паров криогенной жидкости, допускается рост

температуры криогенной жидкости до температуры, не превышающей температуру фазового перехода СПГ при данном рабочем давлении, что обеспечивает поддержание потока криогенной жидкости в однофазном состоянии. СПГ перекачивается по низкотемпературному теплоизолированному трубопроводу насосным оборудованием. Возможна установка промежуточных насосных станций и станций захлаживания в зависимости от необходимого расстояния перекачки. Для транспортировки используется трубопровод из СВМПЭ 1 в изоляционном покрытии, представленный на рисунке 8. СВМПЭ обладает значительно меньшими коэффициентом теплопроводности и шероховатостью внутренней поверхности стенки трубы, что обеспечивает увеличение протяженности линии без сооружения дополнительных насосных и охлаждающих станций.



1 – трубопровод из СВМПЭ; 2 – теплоизоляционный слой; 3 – пароизоляционный слой; 4 – покровный слой

Рисунок 8 – Поперечное сечение трубопровода из СВМПЭ (Патент РФ № RU 2761148, 19.05.2021, Карякина Е.Д., Шаммазов И.А., Шальгин А.В).

На основании проведенных тепловых и гидравлических расчетов, с учетом выполненной оценки НДС, разработан и обоснован технологический процесс трубопроводной транспортировки СПГ с применением СВМПЭ в качестве конструкционного материала для устройства подземного трубопровода.

Таким образом, **второе положение**, вынесенное на защиту, **считается доказанным**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи развития трубопроводных транспортных систем СПГ с целью повышения эффективности технологического процесса транспортировки сжиженного природного газа за счет использования труб из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, что имеет существенное значение для развития нефтегазовой отрасли и полимерной промышленности.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований показали, что не проработаны в достаточной мере вопросы трубопроводного транспорта СПГ, механизмы разрушения полимеров и характер изменения показателей прочности при криогенных температурах.

2. Экспериментально доказана возможность использования СВМПЭ в качестве несущего материала трубопровода при рабочих параметрах транспортировки СПГ. По результатам экспериментальных исследований прочностных свойств СВМПЭ в условиях криогенных температур было выявлено увеличение прочности в 1,4 раза, ударной вязкости в 2,5 раз при сохранении вязкого характера разрушения, что объясняется увеличением энергии процесса разрушения.

3. На основании разработанной методики теплового и гидравлического расчетов подземного СПГ трубопровода обосновано увеличение расстояния транспортировки, достигаемое за счет сокращения тепловых и гидравлических потерь.

4. Разработан и обоснован аналитически-расчетным путем с использованием компьютерного имитационного моделирования технологический процесс транспортировки СПГ по полимерным трубопроводам.

Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования может быть связано с проведением исследований оценки влияния термоциклических нагрузок на прочность СВМПЭ и соответственно определения срока службы криогенного трубопровода.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Карякина, Е.Д. Анализ технических решений в области транспорта и хранения сжиженного природного газа / В.А. Воронов, **Е.Д. Карякина**, Э.В. Ахмеров // Вестник Международной академии холода. - 2019. - № 3. С. 15–22.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования:

2. Karyakina, E.D. Main aspects of liquefied natural gas process line thermal and hydraulic calculations / **Karyakina E.D.**, Shammazov I.A., Shalygin A.V. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 15 March 2021. - Volume 677. - Issue 5. 052056. Scopus.

3. Karyakina, E.D. The Simulation of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Cryogenic Pipeline Stress-Strain State. **Karyakina E.D.**, Shammazov I.A., Voronov V.A., Shalygin A.V. // Materials Science Forum. – 20 May 2021. - Volume 1031, PP. 132–140. Scopus.

4. Karyakina E.D. The LNG flow simulation in stationary conditions through a pipeline with various types of insulating coating / Shammazov I.A., **Karyakina E.D.** // Fluids - 2023. - 8(2). – 68. Web of Science.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Патент РФ № RU 2761148 Российская Федерация, МПК F16L 9/12 (2006.01), F17D 1/14 (2006.01). Способ транспортировки криогенных жидкостей: № 2021114128: заявл. 19.05.2021: опубл. 06.12.2021 / **Карякина Е.Д.**, Шаммазов И.А., Шалыгин А.В.; заявитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 10 с.: ил.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № RU 2021665688 Российская Федерация. Программа для теплового и гидравлического расчетов подземного трубопровода сжиженного природного газа. № 2021664592: заявл. 21.09.2021, дата регистрации: 30.09.2021 / **Карякина Е.Д.**, Шаммазов И.А., Дониц И.Е. заявитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 7 кб.